

日射の影響を考慮した市街地の風環境の予測・評価法に関する基礎的研究
 対流・放射シミュレーションによる夏季の外部空間の温熱環境指標(SET*)の算出

Prediction of Wind Environment in Urban Area including Thermal Effect by Solar Radiation
 Distribution of SET* in Summer Season predicted by Numerical Simulations of Convective and Radiative Heat Transports

持田 灯* 村上 周三**
 Akashi MOCHIDA Shuzo MURAKAMI,
 大森 敏明*** 富永 禎秀****
 Toshiaki OMORI Yoshihide TOMINAGA

ABSTRACT

This paper presents a new method for numerical prediction of wind environment in outdoor living space which includes the thermal effect by solar radiation. Radiative and convective heat transports near building blocks are analyzed using the meteorological data at 3:00 pm on July 23. Furthermore, spatial distribution of the Standard Effective Temperature (SET*) is calculated in order to evaluate the pedestrian level comfort using the data given from the numerical prediction.

Key Words: Wind Environment, Numerical Simulation, Solar Radiation, SET*

1. 序 屋外の風環境評価は、従来主として強風に係わる風害問題と関連して行われてきた^{文1)}。本研究では、我々が日常的に体験している比較的低風速の風の吹く屋外環境の快適性の評価を研究対象とする。このような場合、日射あるいは温度の影響を組み込んだ総合的な環境評価が必要と考えられる^{文2-4)}。温熱環境の快適性に関しては周知の様に室内環境の分野で多くの研究がなされ、いくつかの優れた温熱環境指標が提案されている^{文5)6)}。又、屋外環境に関しても、実測データや気象データを用いてSET*(Standard Effective Temperature)等の分布を算出した例が多く報告されている^{文7-11)}。本研究では3次元数値シミュレーションにより市街地の放射場・対流場を解析し、これに基づき、SET*の空間分布の算出を試みる。これを行うためには、放射場、対流場、人体熱平衡、地表面や建物壁面境界条件等に関する適切なモデル化が必要となる^{文5)6),12-15)}。これらの取り扱いに関しては、本報では部分的に簡略化したモデルを用いて、SET*算出までの一連の手続きを行った。放射・対流解析に基づく屋外環境予測の計算方法やモデルの改良について、今後さらに検討を続ける予定である。

2. 計算概要 1)街区モデル(図1)：同一形状の立方体建物モデル(1辺30m)で構成される均等街区を想定。2)気象条件：東京の7月23日午後3時を対象とする。この時の太陽位置を図1中に示す(太陽高度は

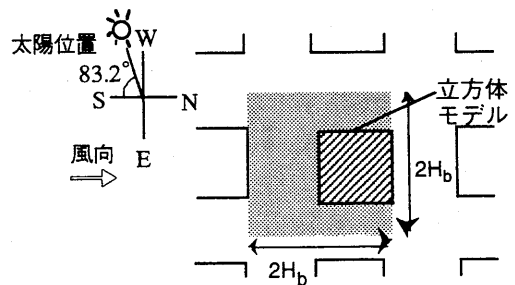
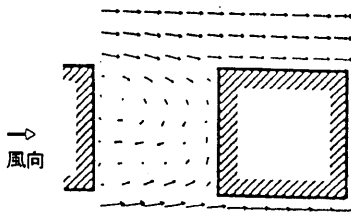
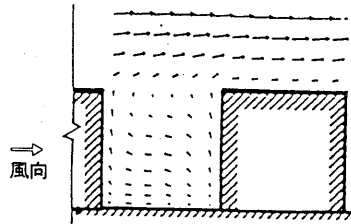


図1 街区モデル

* 東京大学生産技術研究所 講師 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)
 ** 東京大学生産技術研究所 教授 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)
 *** 東京ガスエネルギー技術研究所 (〒106 東京都港区芝浦1-16-25)
 **** 東京大学大学院生 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)

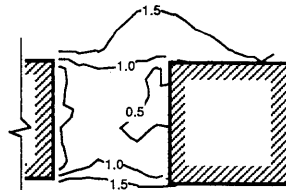


(1) 水平断面 (高さ3m)

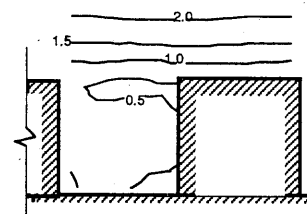


(2) 鉛直断面 (中心断面)

図2 風速ベクトル



(1) 水平断面 (高さ3m)



(2) 鉛直断面

図3 スカラー風速分布 (単位m/s)

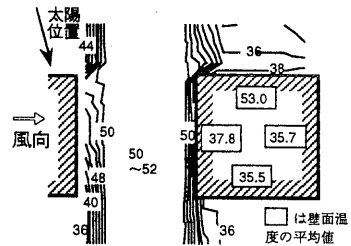


図4 地表面温度の分布
(単位℃、以下同じ)

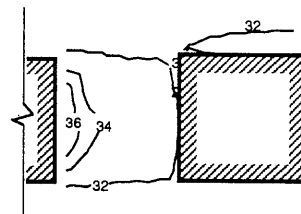


図5 気温の水平分布 (高さ3m)

45.2°)。風向は南風。法線面直達日射量は658 kcal/m²h、水平面天空日射量は117 kcal/m²h。外気温、相対湿度はそれぞれ31.6℃、58%(東京の1989～1992年の7/23午後3時の平均)。又、気象庁高さ(74.6m)の風速を3.0m/sとした(東京の7月の1975～1990年の平均(文16))。3)計算概要：まず一連の放射計算に基づき市街地の熱移動解析を行い、地表面、建物壁面の表面温度、対流熱伝達量等を求めた。詳細を注1に示す。次にこれにより得られた地表面・建物壁面の対流熱伝達量を境界条件として対流計算^{注2)}を行い、各点の風速、温度を求めた^{注3)}。4)SET*の算出：Gaggeら^{文6)}の人体の熱平衡モデルに基づくプログラムに従って算出。発汗による体温調節機構を組み込んだTwo-nodeモデルを使用。着衣量を0.5clo(半袖シャツとズボンの着衣状態に対応)、人体の代謝量は1.5 Met(ゆっくりとした歩行と立位静止時の中間)とした。

3)計算結果・考察 1)風速分布(図2,3)：建物間に大きな循環流が形成され、この部分で低風速となる。高さ3mにおける風速は概ね0.5～1.5m/sである。2)地表面及び空間温度分布(図4,5)：地表面温度は日照部で約50℃、日影部で約35℃と極めて顕著な温度分布が見られる。これに比べ、高さ3mの気温の分布は比較的一様である。これらの傾向は既往の実測結果とよく対応している^{文7)13)}。3)平均放射温度(MRT)の分布(図6)：人体の日射反射率 p が0.5の場合、日照面では約55℃前後なのに対して日影面では35～40℃となり、日照面と日影面では顕著な差が生じている(図6(2))。屋外空間の温熱環境に日射が極めて強い影響を与えることが判る。また $p=0.0$ の場合と $p=1.0$ の場合では日照部のMRTの値が大きく異なる(図6(1), (3))。

4)SET*の分布：SET*もMRTとほぼ似た分布傾向を示し、日照面と日影面に顕著な差が生じている。日影部においても $p=0.5$ の場合でSET*は32～36℃と快適範囲をはるかに越える値を示している。注1⑤に示したように本解析ではSET*を人体形状に対するMRTではなく微小球体に対して定義されるMRTより算出している。これによりSET*の値がやや高めとなっている可能性がある^{文8)15)}、今後検討を加えたい。またMRTと同様、SET*も p の取り扱いにより日照部では値が大きく変化しており、人体の日射反射率 p の取り扱いが重要である。

4) 結論

①屋外空間の温熱環境には日射が大きな影響を与え、日照面と日影面ではMRT, SET*の予測結果に顕著な差が生じる。従って、風環境の評価に温熱感覚の因子も組み込む際には、日射の影響を適切に考慮する必要がある。

②MRTやSET*の値は人体の日射反射率 p の取り扱いにより、大きく変化する。

③今後、SET*等を用いた屋外の温熱快適性の評価法の精度向上を図るとともに、これを考慮した風環境の予測・評価法について検討していきたい。

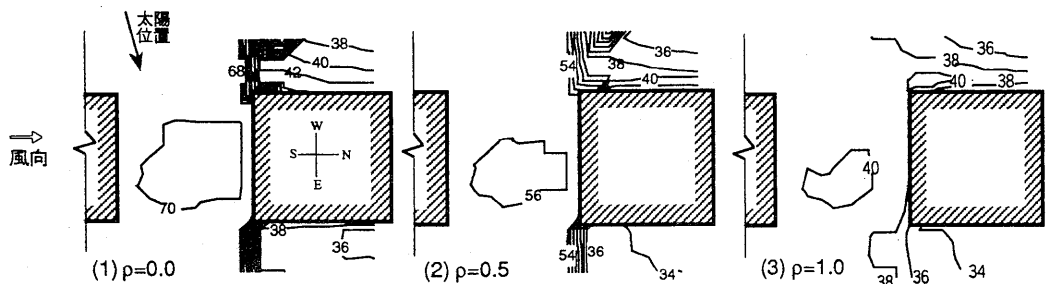


図6 MRTの水平分布 (高さ3m, ρは人体の日射反射率)

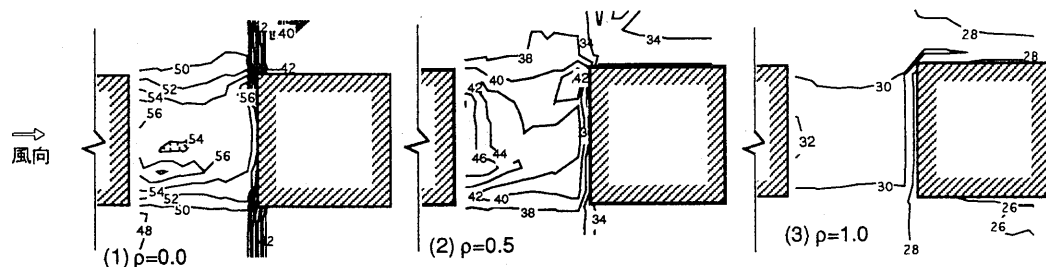


図7 SET*の水平分布 (高さ3m)

【注1】市街地における放射による熱移動計算の概要

①メッシュiへの直達日射エネルギー- E_{Di}

$$E_{Di} = A_i \beta_i I_N \cos \theta \quad (1)$$

A_i : メッシュiの面積[m²],

β_i : メッシュiの日射受照率[-](文17)

I_N : 法線面直達日射量[kcal/m²h]

θ : 外向き法線ベクトルに対する太陽光の入射角

②メッシュiへの天空日射エネルギー- E_{Si}

$$E_{Si} = A_i F_{is} I_{SH} \quad (2)$$

F_{is} : メッシュiから天空をのぞむ形態係数(文17)

I_{SH} : 快晴時の水平天空日射量(本解析ではベルラゲの式によって近似)(文17))

③メッシュiにおける吸収エネルギー- Q_{Di}

と反射エネルギー- Q_{Ri}

太陽光に照射されたメッシュiの短波長吸収率を α_i とすると、直接吸収されるエネルギー- Q_{Di} 及び反射されるエネルギー- Q_{Ri} はそれぞれ(3), (4)式となる。

$$Q_{Di} = \alpha_i (E_{Di} + E_{Si}) \quad (3)$$

$$Q_{Ri} = (1 - \alpha_i) (E_{Di} + E_{Si}) \quad (4)$$

本研究では地表面、建物壁面の日射反射率を一律に0.2とした($\alpha_i = 0.8$)。メッシュiで反射されたエネルギー- Q_{Ri} は、各面で反射されながら天空(宇宙空間)を含むいずれかの面に吸収される。このようにしてメッシュiで反射されたエネルギー- Q_{Ri} の中でメッシュjに到達し吸収されるエネルギー- Q_{Aij} は、Gebhartの吸収係数 B_{ij} を用いて(5)式で計算できる。

$$Q_{Aij} = B_{ij} Q_{Ri} \quad (5)$$

各面の寄与を考慮すれば、面に吸収される日射による全エネルギーは、

$$Q_i = Q_{Di} + \sum_{j=1}^n Q_{Aji} \quad (6)$$

④地表、建物の表面温度解析

上述の方法により各メッシュにおける日射取得エネルギーが求められる。これをそのメッシュにおける表面発熱 Q_{SOLAR} として扱い、大気放射(プラントの式を用いて近似)を含む長波長放射伝熱 Q_{RD} 、対流伝熱 Q_{CV} 、建物及び地中への熱伝導 Q_{CD} 、植物等の蒸発散による放熱 Q_{EV} からなるエネルギー収支式を地表面および建物外表面の各点で解き、表面温度を求める。

$$Q_{SOLAR} + Q_{RD} + Q_{CV} + Q_{CD} + Q_{EV} = 0 \quad (7)$$

メッシュiについて各項を示すと、

$$Q_{RD_i} = \sum_{j=1}^n B_{ji} (\epsilon_j A_j \sigma T_j^4) - \epsilon_i A_i \sigma T_i^4 \quad (8)$$

σ : ステファン・ボルツマン定数[kcal/m²hK⁴]

ϵ_i : 放射率[-]

$$Q_{CV_i} = A_i \alpha_c (T_{ai} - T_i) \quad (9)$$

α_c : 対流熱伝達率[kcal/m²hK]

ここでは $\alpha_c = 10$ kcal/m²hKとして空間一律に与えた。本研究では上空風速3.0m/sの解析を行ったので、地表付近では風速1~2m/sの領域が多く、ユルゲスの式から α_c を求めると全般にほぼ10前後となる。

T_{ai} : 面i上の温度境界層外縁の温度[K]

本解析では気温分布に大きな差がみられなかったため(図5)、空間一律に $T_{ai} = 31.6^\circ\text{C}$ とした。

$$Q_{SOLAR} = Q_i \quad (Q_i \text{は(6)式より}) \quad (10)$$

地中への熱伝導 Q_{CD} は、次式で与えた。

$$Q_{CD_i} = -A_i \lambda (T_i - T_{bi}) / \Delta z \quad (11)$$

λ : 地面の熱伝導率[1.0 kcal/mhK]

T_{bi} : 深さ Δz の地中温度($\Delta z=50\text{cm}$, $T_{bi}=28^\circ\text{C}$)

又、建物壁体の Q_{cdi} は、壁体の熱コンダクタンス
5kcal/m²hK、室温26°C、室内側壁面の総合熱伝達率
8kcal/m²hKと仮定して計算した。

$$Q_{Evi} = (f_s - f_a) \ell \alpha_w w_i \quad (12)$$

f_s : 飽和水蒸気圧[mmHg]

f_a : 大気中の水蒸気分圧[mmHg]

ℓ : 蒸発潜熱 (597.5 kcal/kg)

α_w : 湿気伝達率($\approx 4\alpha_s/1000$) [kg/m²h mmHg]
(ルイスの関係より)

w_i : 濡れ率[-] (緑地が緑地率30%で均一に分布していると想定し、地表面で $w_i=0.03$ (文18)。予備計算の結果によれば w_i の値の大小は地表面温度に大きな影響を及ぼすので、慎重な検討が必要であると考えている。)

⑤平均放射温度(MRT)の解析

簡易モデルとして半径 r の微小球に入射する全放射エネルギーを考える。平均放射温度(MRT)の定義に基づいて次の近似式で与える。

$$4\pi r^2 \sigma T_n^4 = (1-p) \pi r^2 q + \sum_{j=1}^n 4\pi r^2 F_{ij} \sigma T_j^4 \quad (13)$$

右辺第1項は日射により直接的に微小球に到達し、吸収される放射エネルギーを表す。

T_n : 位置 i における平均放射温度[K]

q : 日射により直接的に微小球に到達した放射エネルギー流束[kcal/m²h]

F_{ij} : 位置 i における微小球から面 j をのぞむ形態係数[-]

T_j : 面 j の温度[K]

p : 人体の短波日射反射率本解析では $p=0, 50, 100\%$ の3種類を比較(図6, 7))

$$T_n^4 = (1-p) q / (4\sigma) + \sum_{j=1}^n F_{ij} T_j^4 \\ = (1-p) q / (4\sigma) + T_{ro}^4 \quad (14)$$

T_{ro} : $q=0$ の場合の平均放射温度[K]

(14)式を線形化すると、

$$T_n = T_{ro} + (1-p) q / (16\sigma T_{ro}^3) \quad (15)$$

⑥放射計算のメッシュ分割

図1中央の斜線の建物とそれを取り囲む8棟の計9棟の建物周辺の領域を解析。メッシュ数は合計1,314。最小のメッシュ幅は2m。

注2) 対流計算の概要

Viollet型のk-εモデルを使用。図1中の■部分を解析対象としてその流入、流出面を周期境界で接続。ただし、流入側と流出側の境界の間の圧力損失に対応する圧力差 Δp を与えた。 $\Delta p=5 \times 10^{-4} \rho U_0^2$ 、ここで $U_0=3.0\text{m/s}$ 。鉛直方向には5H₀の解析領域を設けた。側面は対称壁($\langle u_y \rangle=0$ 、他の諸量の法線方向の勾配は0)、上空間は $\langle u_z \rangle=0$ 、他の諸量の勾配は0。但し、温度については、温度自体ではなく $(v_i/\sigma_0) \partial \langle \theta \rangle / \partial x_j$ (本計算では乱流ブ

ントル数 $\sigma_0=0.5$) で評価される乱流熱フラックスの勾配を0とした。地上面、建物壁面では、 τ_w は generalized log law で与え、対流熱伝達量は注1)(9)式の計算結果を補間して与えた。差分スキームは時間に関しては後退差分、空間に関しては1次精度風上差分。メッシュ分割は $(14(x_1) \times 14(x_2) \times 29(x_3))$ 。

注3) 本来は対流計算により与えられた風速・気温分布を用いて、一定の緩和step毎に放射計算の境界条件として用いられる対流熱伝達量 Q_{cvi} の値を更新しながら計算を進めるべきであるが、今回は両者の連成計算は行わなかった。今回の計算対象の場合、風速や気温に大きな分布が生じていないので(図3, 5)、これによる誤差は比較的小さいものと予想される。

謝辞 本研究は日本建築学会・地球環境建築特別研究委員会(安岡正人委員長)の「都市気候モデリング小委員会」(村上周三主査)の活動の一環として行われたものである。

参考文献

- 文1)例えば村上, 岩佐, 森川: 建築学会論報, 第325号, 1983年3月, pp.74-84.
文2)村上, 森川: 建築学会論報, 第358号, 1985年12月, pp.9-17.
文3)P. Bosselmann et al.: Sun, Wind, and Pedestrian Comfort, The Dept. of Planning and Development, City of Toronto, Dec. 1990.
文4)M.J. Soligo, P. A. Irwin and C.J. Williams: Proc. Third Asia-Pacific Symp. on Wind Eng., vol. II, Dec. 1993. pp.961-966.
文5)P.O. Fanger: Thermal Comfort, Robert E. Krieger Publishing Company, 1982.
文6)A. P. Gagge et al.: ASHRAE Transactions, 92(1), 1986. pp. 709-731.
文7)石井, 片山他: 建築学会論報, 第386号, 1988年4月, pp.28-37.
文8)中島, 片山, 石井他: 建築学会大会, 1988年10月, pp.1135-1138.
文9)大岡, 中村, 平岡: 建築学会大会, 1989年10月, pp.859-860.
文10)H. Akasaka and N. Miki: Energy and Buildings, 15-16(1990/91). pp.1011-1023.
文11)堀越, 芹生: 大阪市立大学生生活科学部紀要, 第35巻, 1987年, pp.133-138.
文12)中村, 平岡, 西村: 建築学会論報, 第364号, 1986年6月, pp.57-65.
文13)中村, 平岡, 西村: 建築学会論報, 第364号, 1986年6月, pp.48-56.
文14)中村, 平岡: 建築学会論報, 第367号, 1986年9月, pp.8-14.
文15)中村: 建築学会論報, 第376号, 1987年6月, pp.29-35.
文16)日本気候表, 気象庁, 1991年3月
文17)大森, 村上, 加藤: 大規模アトリウム空間における温熱空気環境の数値シミュレーション(その1), 建築学会大会, 1994年9月, pp.927-928.
文18)森山, 松本: 建築学会大会, 1986年8月, pp.123-124.
文19)松井, 村上, 持田: 建築学会大会, 1992年8月, pp.537-538